



# Fonctionnement optimal d'une pompe à chaleur thermoélectrique (PACTE) air-air pour différents couplages à un bâtiment basse consommation (BBC).

GDR Thermoélectricité 2012, 05 Décembre

Responsables du projet : M. Pascal DALICIEUX  
M. Philippe BARANEK

Directeur de thèse: M. Gilles FRAISSE  
Co-encadrant: M. Julien RAMOUSSE



**KIM Yeweon**



# PLAN

## ○ Contexte

- Contexte global et solution potentielle
- Qu'est-ce qu'une PACTE ?

## ○ Modélisation de la PACTE

- Equations de la thermoélectricité

## ○ Optimisation pour les conditions instantanées

- 1<sup>er</sup> scenario : **Couplage PACTE à  $T_{ext}$**
- 2<sup>e</sup> scenario : **Couplage PACTE avec un échangeur statique (amont)**
- 3<sup>e</sup> scenario : **Couplage PACTE avec un puits canadien**

## ○ Optimisation pour les conditions saisonnières

- Évaluation du **COP<sub>s</sub>** en fonction du **climat**, pour les **différents couplages**

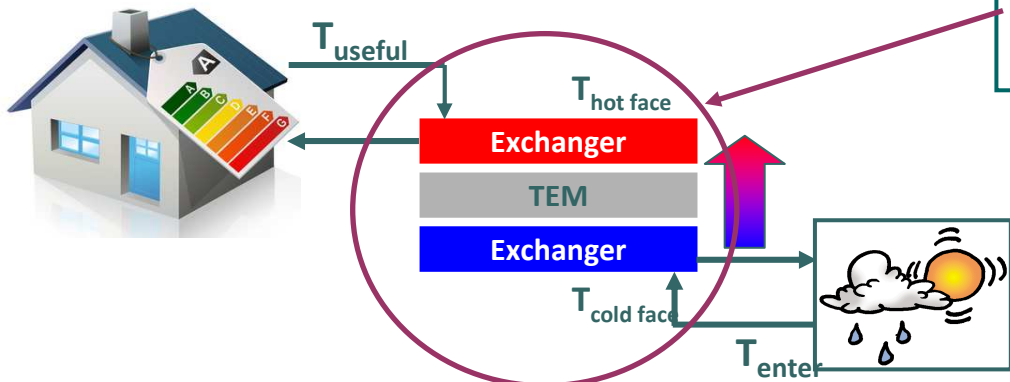
## ○ Conclusion

# CONTEXTE

## Contexte global



## Solution potentielle : PACTE



**PACTE** :COP intéressants pour faibles  $\Delta T$   
 →BBC : VMC Double Flux avec recyclage d'air  
 →Intensification des transferts dans les échangeurs

Figure1 Exemple de couplage d'une PACTE à un BBC

## Qu'est-ce qu'une PACTE ?

### -Fonctionnement

- Modules Thermoélectriques (TEM)
- Application d'un courant électrique
- Transfert de la chaleur d'une source froide vers une source chaude

### -Avantages

- Pas de pièce mobile (nuisance sonore, maintenance)
- Pas de fluide frigorigène (impact environnemental réduit)
- Faible coût

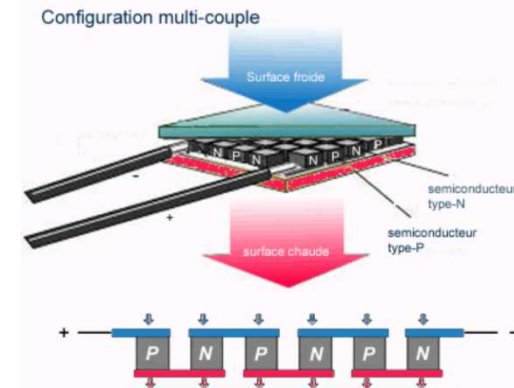


Figure2 Pompe à chaleur thermoélectrique (PAC TE)

# MODELISATION

## -Equations de la thermoélectricité

Modèle simplifié:

$$Q_c = N \left( \alpha \cdot T_c \cdot i + \frac{1}{2} \cdot R \cdot i^2 - K \cdot \Delta T_{cep} \right)$$

Peltier      Joule      Conduction

$$Q_f = N \left( \alpha \cdot T_f \cdot i - \frac{1}{2} \cdot R \cdot i^2 - K \cdot \Delta T_{cep} \right)$$

$$P_{elec} = Q_c - Q_f = \alpha(T_c - T_f) \cdot i + R \cdot i^2$$

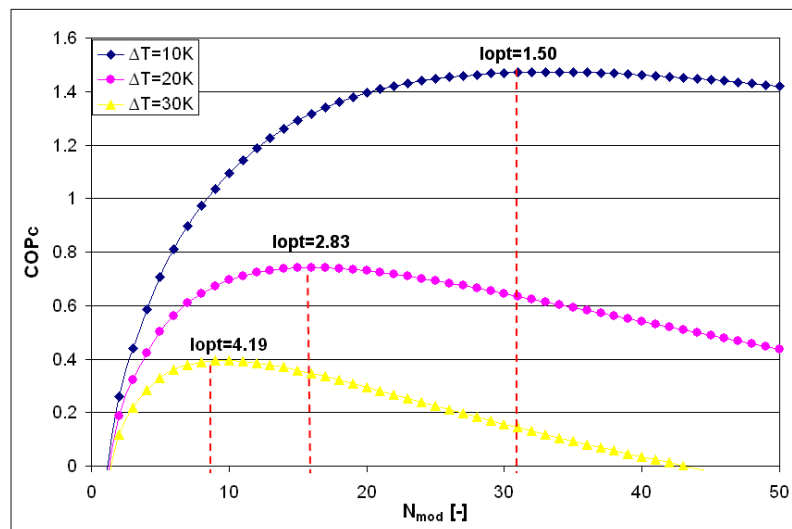
Coefficient de Performance

$$COP_c = \frac{Q_c}{P_{elec}}$$

### Caractéristiques TEM

Ref. 9501/242/160 B, Ferrotec

Description	Dimension
Dimension de CEP	55x55x3.45 (mm <sup>3</sup> )
Nombre de paires de jambe	242 (-)
Resistance électrique	1.7352 (Ω)
Coefficient Seebeck	0.201 (V/K)
Résistance thermique de jambe	2.6637 (K/W)
Résistance thermique d'échangeur	0.001 (K/W)
T <sub>int</sub>	20 (°C)
T <sub>ext_base</sub>	-10 (°C)



Donnée:  $T_c=293 \text{ K}$ ,  $Q_c=1000 \text{ W}$

→ Existence d'un point de fonctionnement optimal ( $COP_{max}$ ) pour toute condition de températures

→ Lorsque  $\Delta T \downarrow$ :  $l^{opt} \downarrow$ ,  $N_{mod}^{opt} \uparrow$

Figure3.  $COP_c$  en fonction de  $\Delta T$  et Nombre de modules optimal



# Hypothèses

- **Objectif:** Optimiser le fonctionnement d'une PACTE couplée au bâtiment (maximiser COP)

## ○ PACTE

- 1 TEM  $\rightarrow$   $COP_{max}$  correspond à  $(I^{opt} ; Q_c^{opt})$
- $N_{mod}$  TEM  $\rightarrow$   $COP_{max}$  correspond à  $(I^{opt} ; Q_c^{besoin})$

- **Recherche du nombre de modules optimal et de l'intensité optimale :** pour répondre aux besoins de chauffage dans le bâtiment en fonction de la température de la source.

- $Q_c^{besoin} = Q_c^{opt} \times N_{mod}^{opt}$

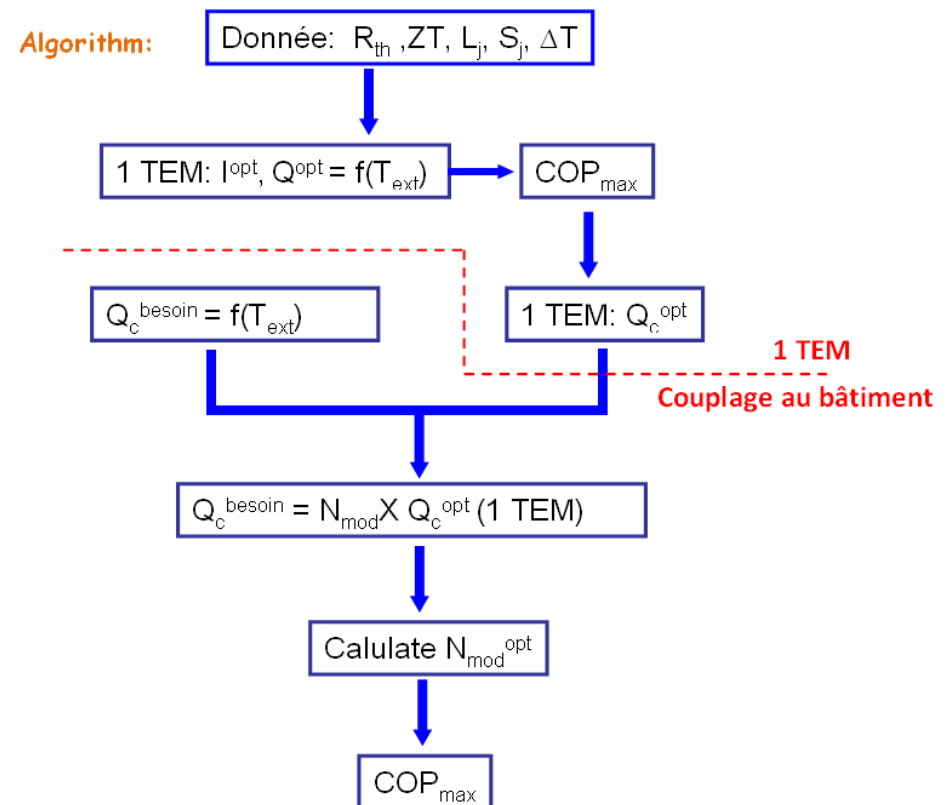


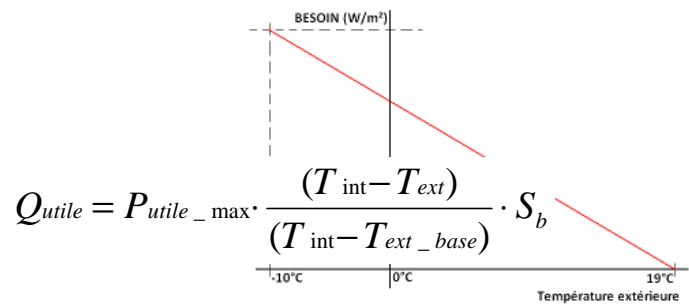
Figure4 Algorithme pour obtenir le nombre de module optimal

# Hypothèses

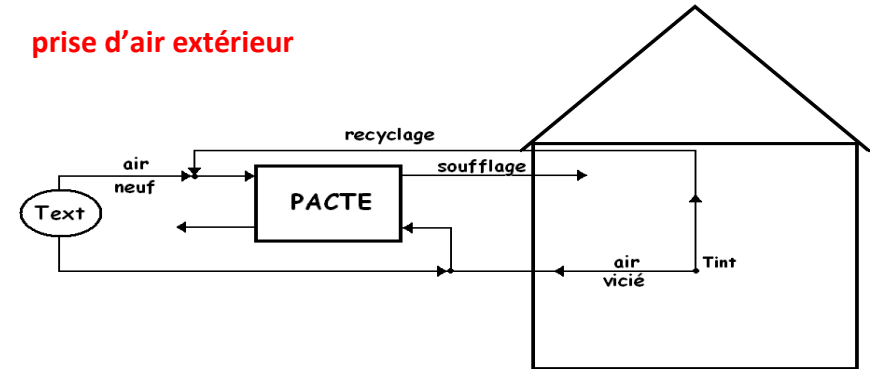
## -Intégration au bâtiment avec 3 scenario

### -Bâtiment

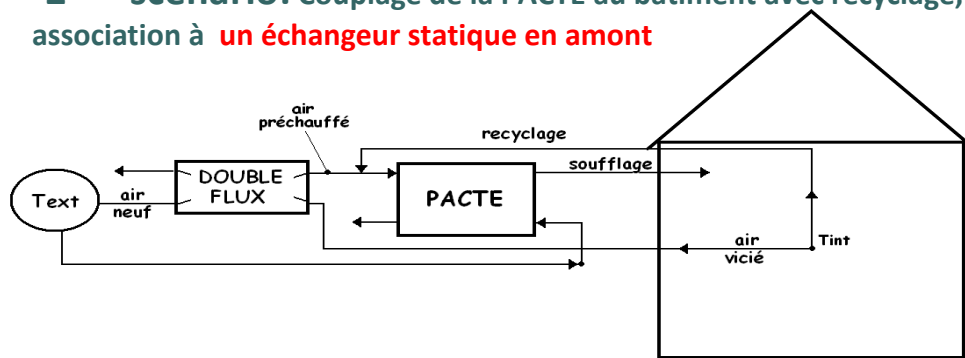
- Bâtiment INCAS (INES): 97.5m<sup>2</sup>x2.7m soit 263.3m<sup>3</sup>
- P<sub>utile</sub> dépend de T<sub>ext</sub> (besoin de chauffage variable):
- P<sub>utile</sub><sup>max</sup>=20 W/m<sup>2</sup> (Trappes)
- Régime permanent dans le bâtiment (T<sub>int</sub>=19°C)



### -1<sup>er</sup> scenario: Couplage de la PACTE au bâtiment, avec prise d'air extérieur



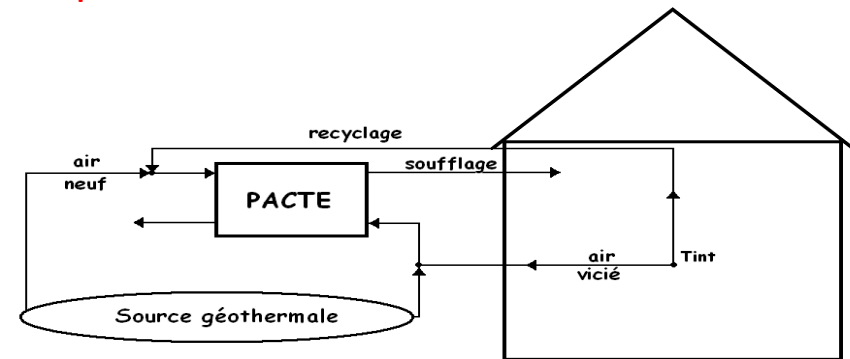
### -2<sup>eme</sup> scenario: Couplage de la PACTE au bâtiment avec recyclage, association à un échangeur statique en amont



6

GDR Thermoélectricité 2012

### -3<sup>eme</sup> scenario: Couplage de la PACTE au bâtiment, association à un puits canadien

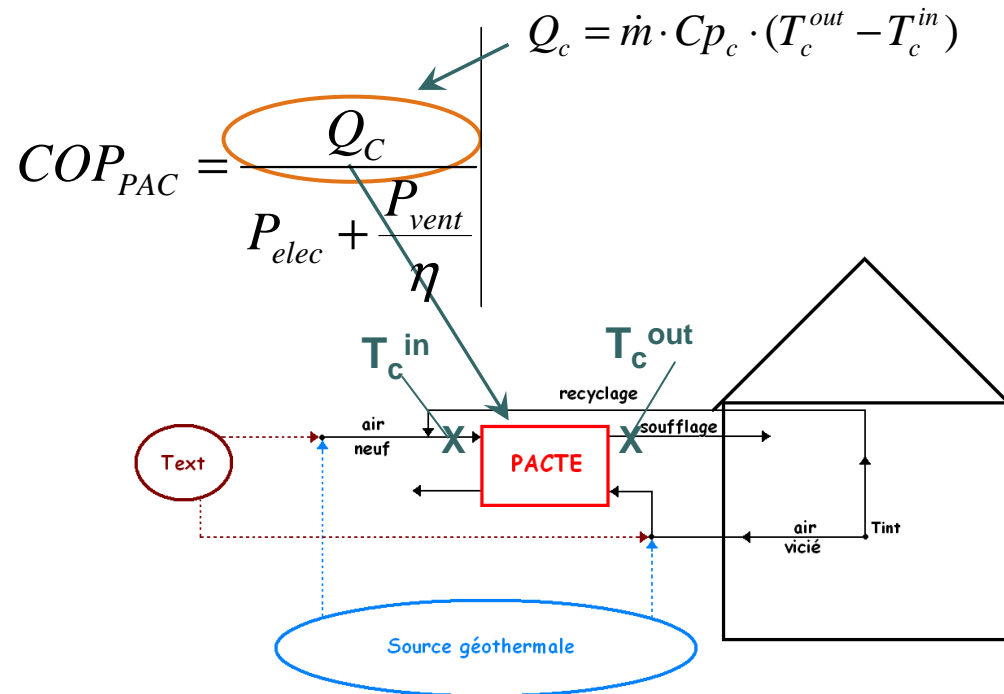


13/12/2012

# Hypothèse

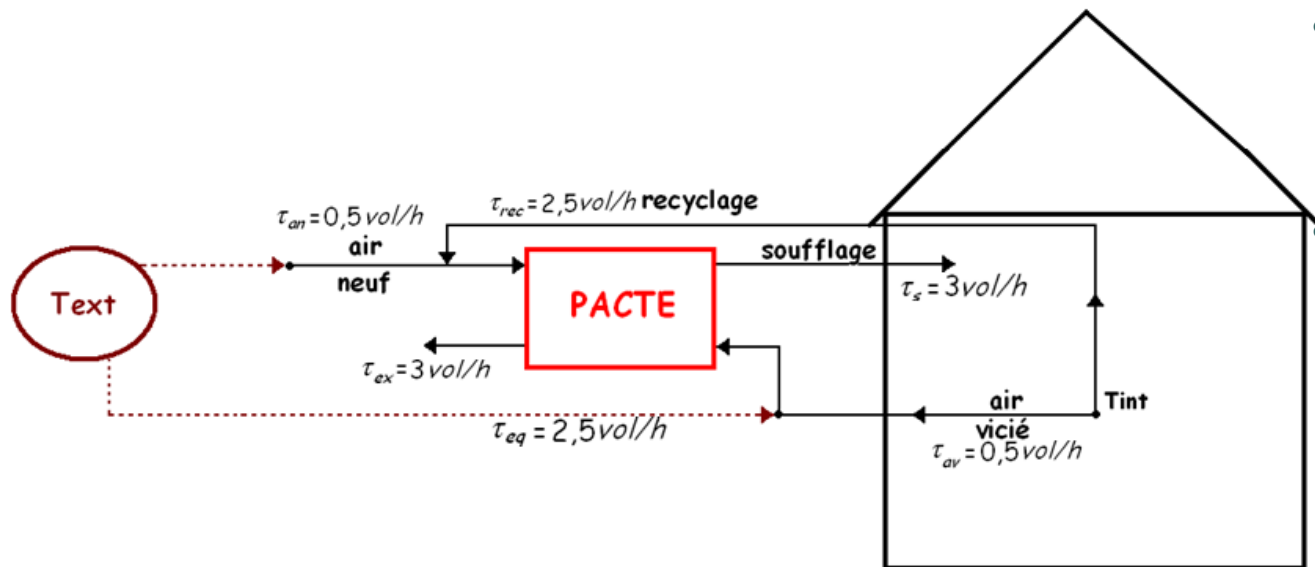
## - Calcul du $COP_{PAC}$

- $COP_{PAC}$  : COP prenant en compte la puissance côté chaud de la PACTE normée par la puissance consommée et par les auxiliaires de circulation  $P_{vent}$  ( $P_{vent} = 0.1 \text{ [W/m}^3\text{]}$  avec un rendement  $\eta = 0.7$ )



# Scénario 1

- 1<sup>er</sup> scénario: Couplage de la PACTE au bâtiment, avec prise d'air extérieur.



- Conditions de fonctionnement:

-  $T_{ext} \rightarrow P_{utile}$  (loi de chauffe)

-  $T_{int}$

-  $N_{mod}$

- Données:

-  $R_{th} = 0.001 \text{ [W/K]}$

-  $P_{vent} = 0.1 \text{ [W/m}^3\text{]}$

- **Côté chaud:** l'air entrant est pris directement à l'extérieur du logement ( $0.5 \text{ vol/h}$ ).

Un mélange est effectué avec de l'air recyclé ( $2.5 \text{ vol/h}$ ).

- **Côté froid:** l'air vicié ( $0.5 \text{ vol/h}$ ) est mélangé à un débit d'air extérieur ( $2.5 \text{ vol/h}$ )

→ Le débit d'air total circulant de part et d'autre de la PACTE est fixé à  $3 \text{ vol/h}$



# Optimisation pour les conditions instantanée

## • 1<sup>er</sup> scénario : Couplage à $T_{ext}$

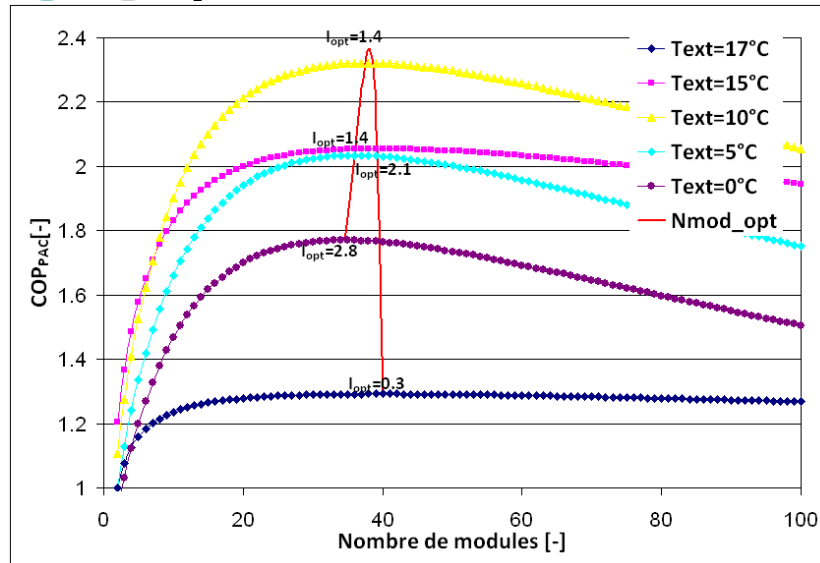


Figure 6 : COP<sub>pac</sub> en fonction de l'intensité et du nombre de modules ( $T_{entrée}=T_{ext}$ )

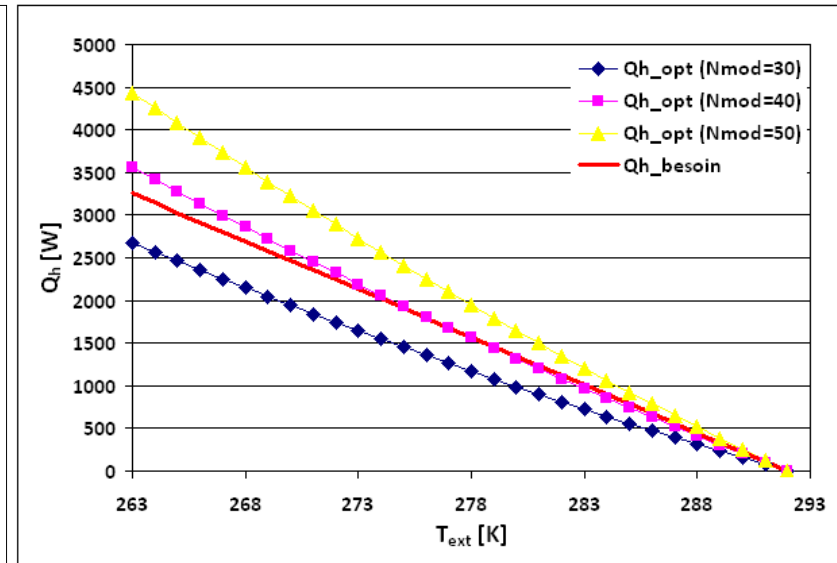


Figure 7 :  $Q_c^{besoin}$  et  $Q_c^{opt}$  en fonction de  $T_{ext}$  et du nombre de modules ( $T_{entrée}=T_{ext}$ )

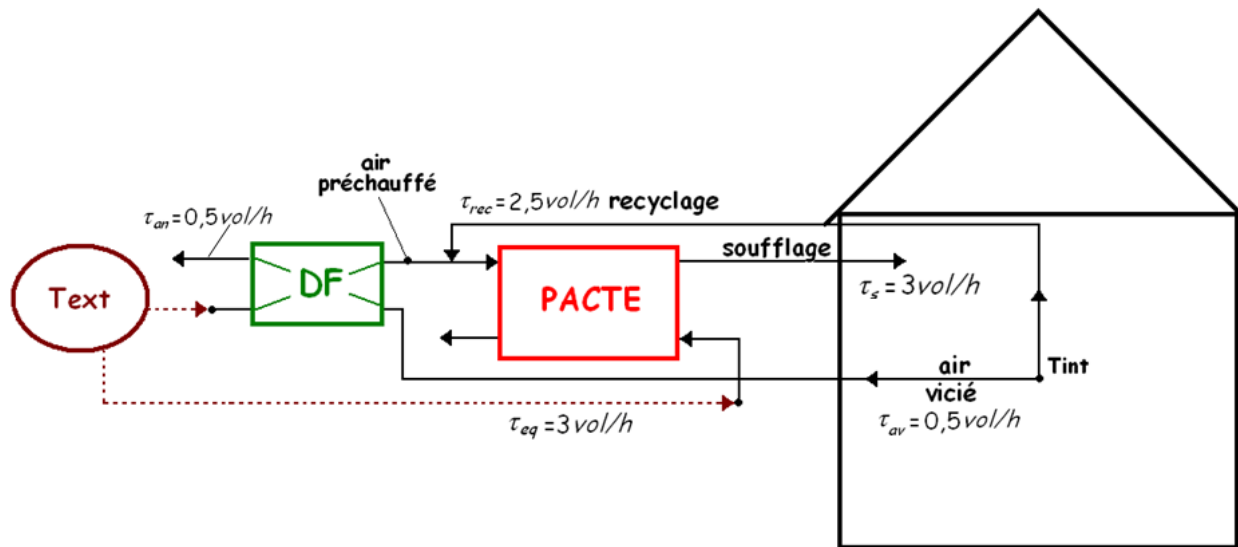
$Q_c^{opt}$ : Puissance thermique optimale fournie par  $N_{mod}$  selon la  $T_{ext}$   
 $Q_c^{besoin}$ : Puissance thermique nécessaire au bâtiment selon la  $T_{ext}$

## Scénario1

- $T_{ext} \uparrow \rightarrow I_{opt} \downarrow$
- Dans ce cas le nombre de modules optimum est à 40.
- **Il existe un nombre de modules optimal quelle que soit  $T_{ext}$**

## Scénario 2

- 2<sup>eme</sup> scenario: Couplage de la PACTE au bâtiment, association à **un échangeur statique**



- Conditions de fonctionnement:

-  $T_{ext} \rightarrow P_{utile}$  (loi de chauffe)

-  $T_{int}$

-  $N_{mod}$

- Données:

-  $R_{th} = 0.001 [W/K]$

-  $P_{vent} = 0.1 [W/m^3]$

- **Côté chaud:** l'air entrant est préchauffé par l'air vicié (0.5 vol/h)  
Un mélange est effectué avec de l'air recyclé (2.5 vol/h).
- **Côté froid:** un débit d'air extérieur est ajusté de manière à équilibrer les débits de part et d'autre de la PACTE (3 vol/h)

→ Le débit d'air total circulant de part et d'autre de la PACTE est fixé à 3 vol/h

# Optimisation

## • 2<sup>e</sup> scénario : Couplage à un amont échangeur statique

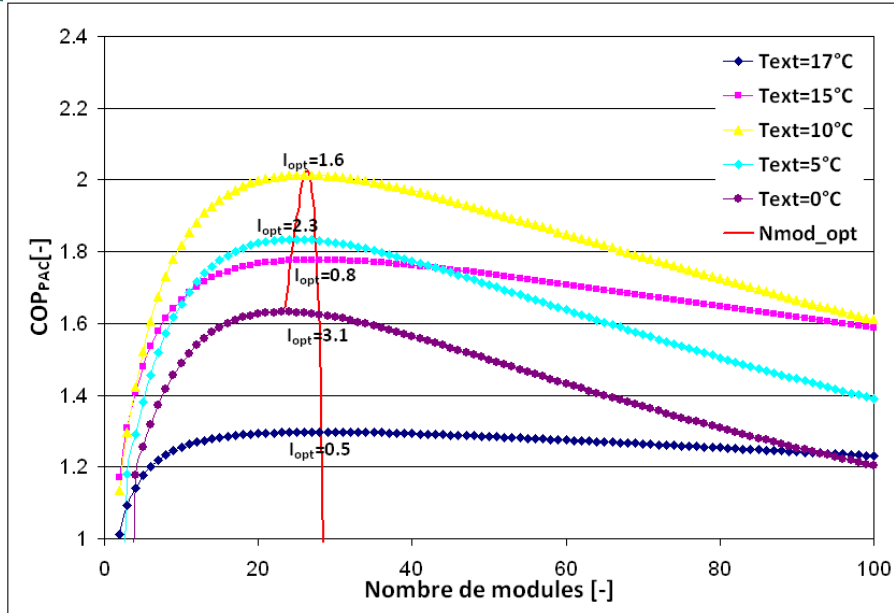


Figure 8 :  $COP_{PAC}$  en fonction de l'intensité et du nombre de modules ( $T_{entrée}=T_{ext}$ )

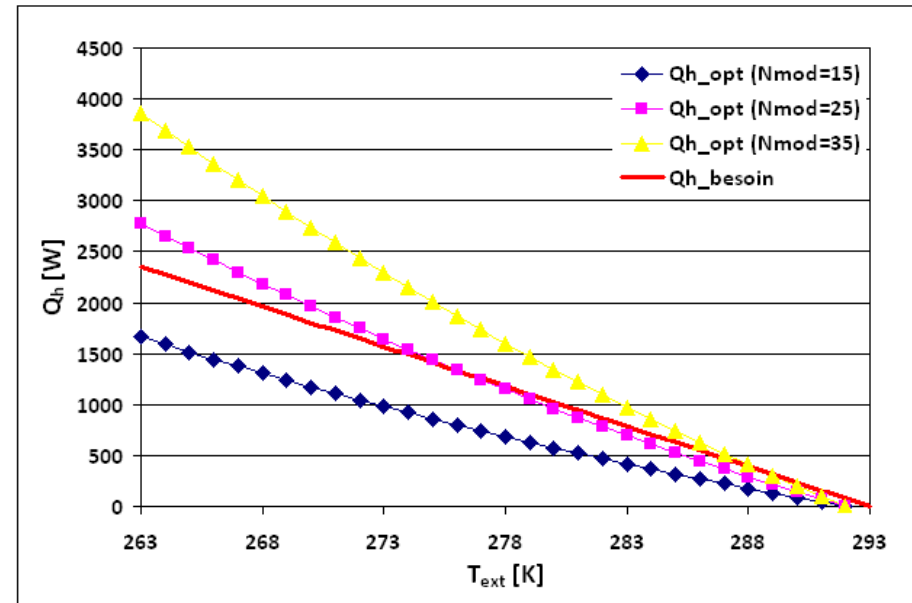


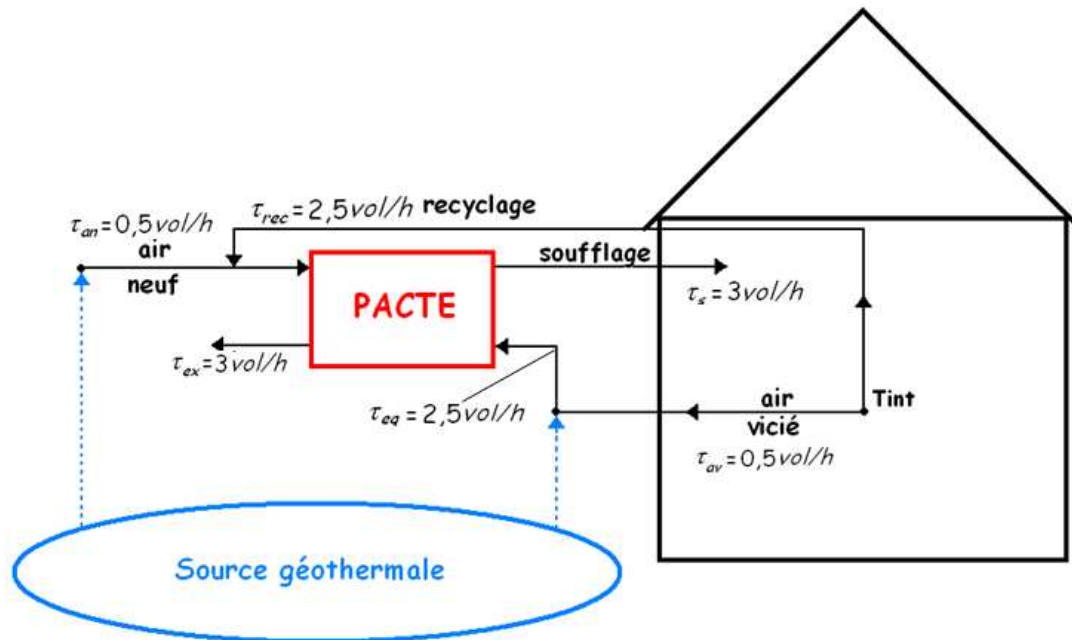
Figure 9 :  $Q_c^{besoin}$  et  $Q_c^{opt}$  en fonction de  $T_{ext}$  et du nombre de modules ( $T_{entrée}=T_{ext}$ )

## Scénario2

- $T_{ext} \uparrow \rightarrow I_{opt} \downarrow$
- Dans ce cas le nombre de modules optimum est à 25.
- **Il existe un nombre de modules optimal quelle que soit  $T_{ext}$**

# Scénario 3

- 3<sup>ème</sup> scenario: Couplage de la PACTE au bâtiment, association à **un system puits canadien.**



- Conditions de fonctionnement:

-  $T_{ext} \rightarrow P_{utile}$  (loi de chauffe)

-  $T_{int}$

-  $N_{mod}$

- Données:

-  $R_{th} = 0.001 [\text{W/K}]$

-  $P_{vent} = 0.1 [\text{W/m}^3]$

- **Côté chaud & Côté froid** : l'air entrant est pris directement à l'extérieur du logement comme 1<sup>er</sup> scenario.

## Ajout de puits canadien

- ▶ Lorsque,  $T_{ext} < 10^\circ\text{C} \rightarrow T_{puits} = 10^\circ\text{C}$
- ▶ Lorsque,  $T_{ext} > 10^\circ\text{C} \rightarrow T_{puits} = T_{ext}$

→ Le débit d'air total circulant de part et d'autre de la PACTE est fixé à 3 vol/h

# Optimisation

- 3<sup>e</sup> scénario : Couplage à  $T_{geo}$

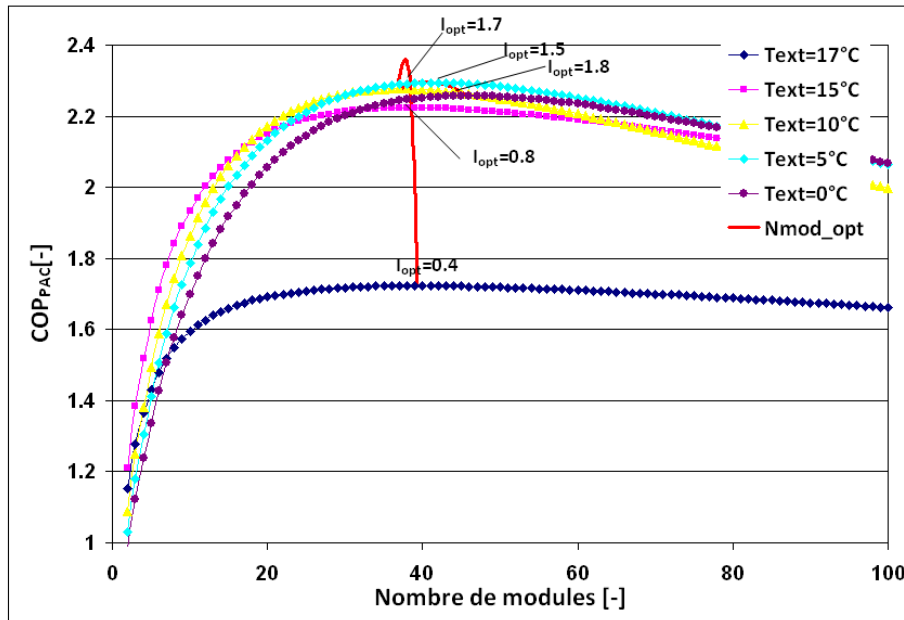


Figure 10 :  $COP_{PAC}$  en fonction de l'intensité avec différents nombres de modules ( $T_{entree}=cst.$ )

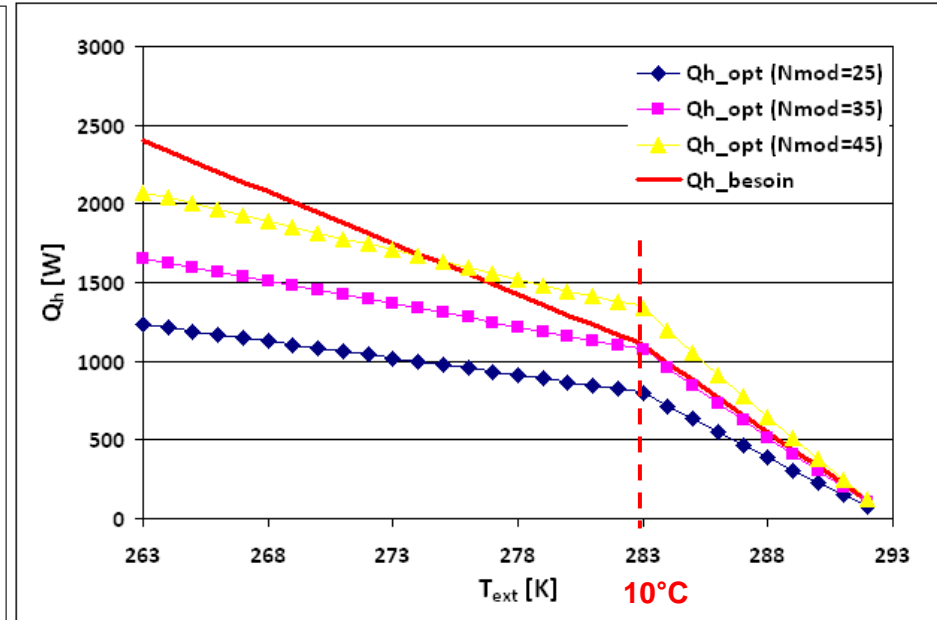


Figure 11 :  $Q_c^{besoin}$  et  $Q_c^{opt}$  en fonction de  $T_{ext}$  et du nombre de modules ( $T_{entree}=cst.$ )

## Scénario3

- $T_{ext} \uparrow \rightarrow I_{opt} \downarrow$
- Dans ce cas le nombre de modules optimum est compris entre 35-40
- **Il existe un nombre de modules optimal quelle que soit  $T_{ext}$**
- Variation du  $COP_{PAC}$  est moins sensible selon les  $N_{mod}$  par rapport scénario 1 et 2.

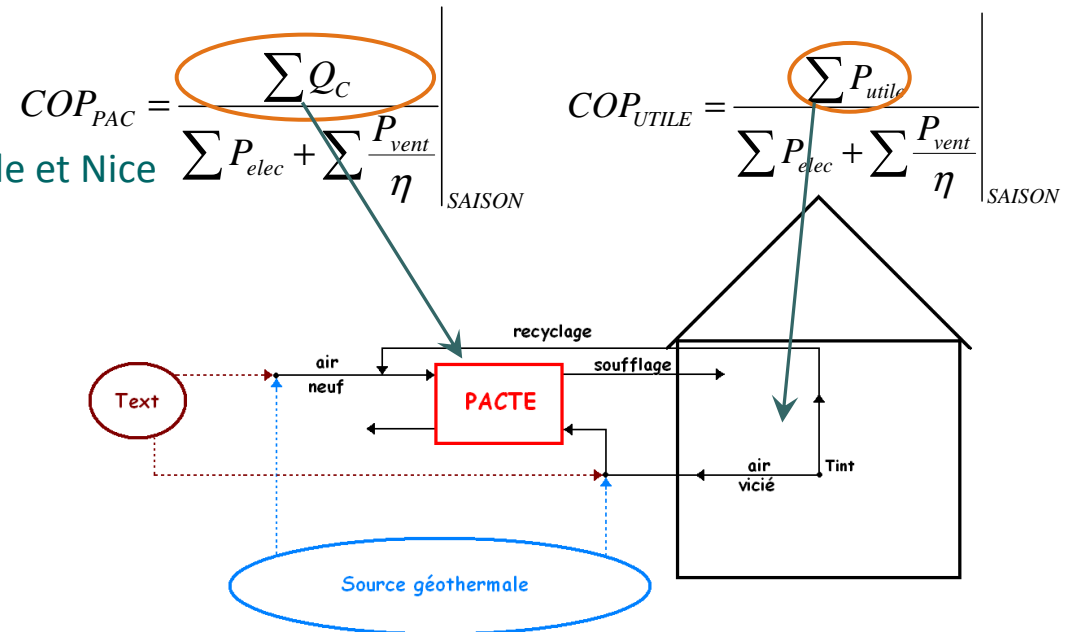
# Couplage au bâtiment

## - Calcul des différents COP

- **COP<sub>c</sub>** : COP prenant en compte la puissance chaude de la PAC sans  $P_{vent}$
- **COP<sub>PAC</sub>** : COP prenant en compte la puissance chaude de la PAC avec  $P_{vent}$   
→ Intérêt pour les fabricants
- **COP<sub>UTILE</sub>** : COP prenant en compte la puissance à fournir au bâtiment avec  $P_{vent}$   
→ Intérêt pour les utilisateur

## ○ Climats

- Villes retenues : Trappes, La Rochelle et Nice



$$COP_{PAC} = \frac{\sum Q_c}{\sum P_{elec} + \sum \frac{P_{vent}}{\eta}}_{SAISON}$$

$$COP_{UTILE} = \frac{\sum P_{utile}}{\sum P_{elec} + \sum \frac{P_{vent}}{\eta}}_{SAISON}$$

Determination  $P_{utile}$  a l'aide du logiciel TRNSYS

# Optimisation pour les conditions saisonnières

## Trappes

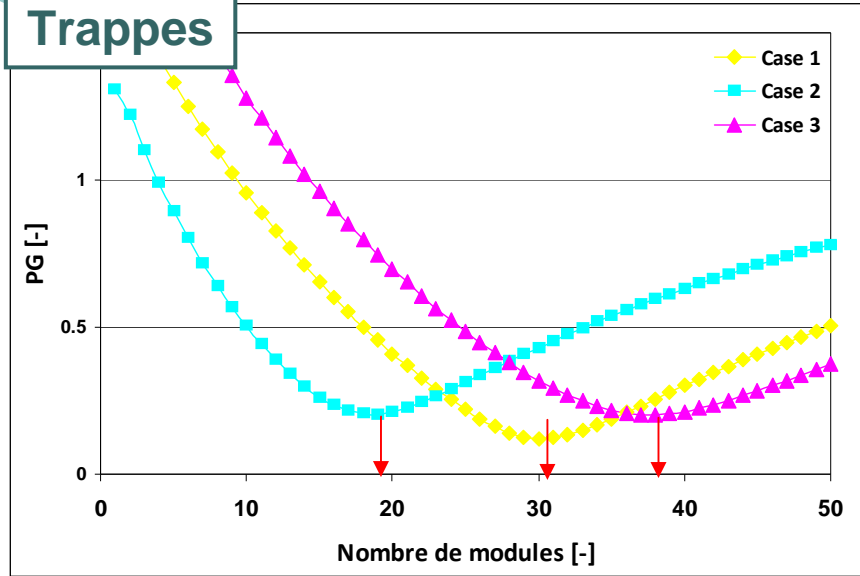


Figure 12 : Performance Gap entre le  $COP_{pac}^{opt}$  et le  $COP_{pac}$

$$PG = COP_{PAC}^s(N_{mod}) - COP_{PAC}^s(N_{mod}^{opt}(T_{ext}))$$

Variable  $N_{mod} \in [1;50]$        $N_{mod}^{opt}$  cst.

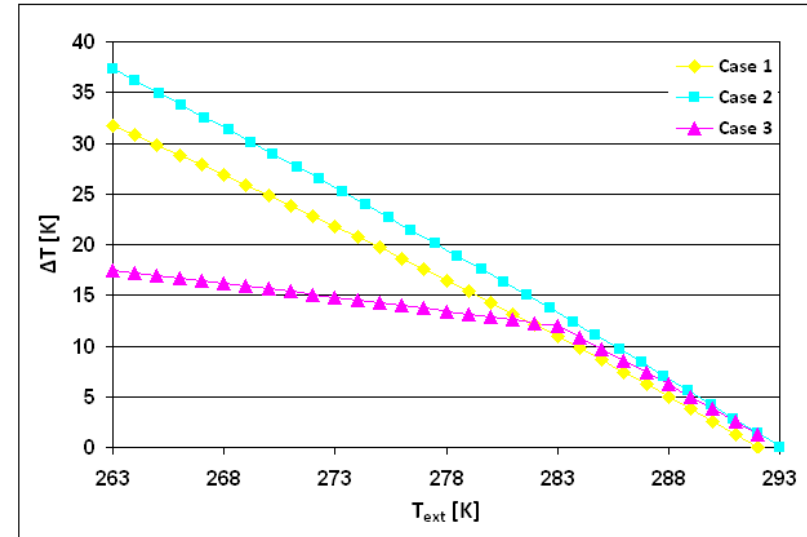


Figure 13 : différence de températures entre deux face de module en fonction de  $T_{ext}$

• **Il existe un nombre de modules optimal pour des condition saisonnières**

•  $N_{mod}^{opt}$  dépendent de l'écart température ( $\Delta T$ ) entre les deux faces des modules

$\Delta T$ : Scenario 3 < Scenario 1 < Scenario 2

$N_{mod}^{opt}$ : Scenario 3 > Scenario 1 > Scenario 2

Lorsque  $\Delta T \downarrow$   $N_{mod}^{opt} \uparrow$

# COP relatif à la PAC ( $COP_{PAC}$ )

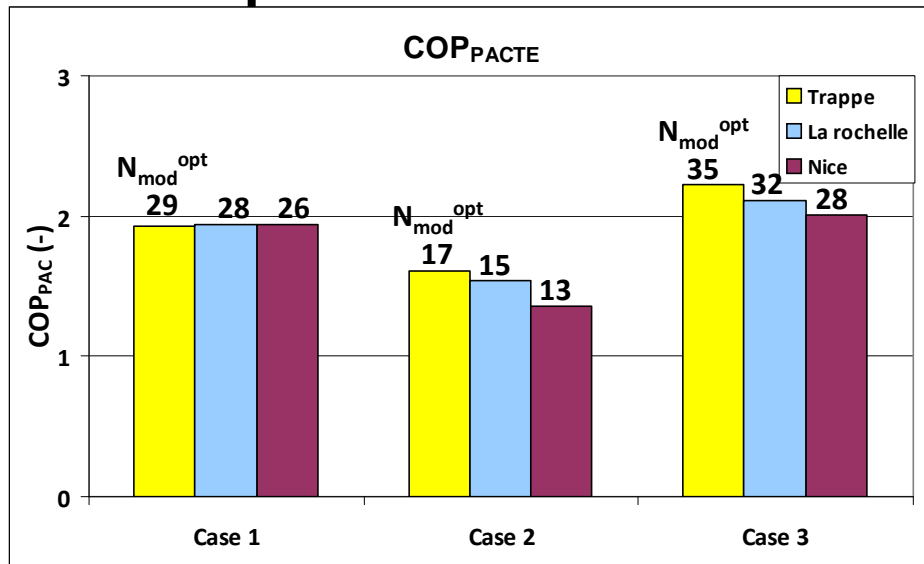


Figure 14 : Evolution du  $COP_{PAC}$  et  $N_{mod}^{opt}$  en fonction du climat, pour les différents couplages

Trappes						
Couplage	$\Sigma P_{utile}$ (MWh)	$\Sigma Q_c$ (MWh)	$\Sigma P_{elec}$ (MWh)	$\Sigma P_{vent}$ (MWh)	$COP_{utile}$	$COP_{PAC}$
Case1		4.61	1.82		0.86	1.9
Case2	2.1	2.85	1.16	0.61	1.18	1.61
Case3		3.65	1.01		1.25	2.24
La Rochelle						
Couplage	$\Sigma P_{utile}$ (MWh)	$\Sigma Q_c$ (MWh)	$\Sigma P_{elec}$ (MWh)	$\Sigma P_{vent}$ (MWh)	$COP_{utile}$	$COP_{PAC}$
Case1		2.33	0.81		0.78	1.94
Case2	0.93	1.35	0.49	0.39	1.06	1.54
Case3		1.91	0.49		0.96	2.11
Nice						
Couplage	$\Sigma P_{utile}$ (MWh)	$\Sigma Q_c$ (MWh)	$\Sigma P_{elec}$ (MWh)	$\Sigma P_{vent}$ (MWh)	$COP_{utile}$	$COP_{PAC}$
Case1		1.07	3.12		0.61	1.94
Case2	0.34	0.56	0.17	0.24	0.82	1.36
Case3		0.92	0.22		0.73	2.01

Figure 15: Bilan des énergies mises en jeu pour les différents couplage et climat

- Le nombre de modules optimal ( $N_{mod}^{opt}$ ) est influencé par le mode de couplage
- $COP_{PAC}$ :
  - ✓ Case3 > Case1 > Case 2
  - ✓ Trappe > La rochelle > Nice
- $COP_{PAC}$  est plus intéressant à Trappes et à La Rochelle
  - ✓ La  $P_{vent}$  devient élevée par rapport  $Q_h/P_{utile}$  dans les région chaude (Nice).



# COP relatif au couplage PAC-BBC ( $COP_{\text{utile}}$ )

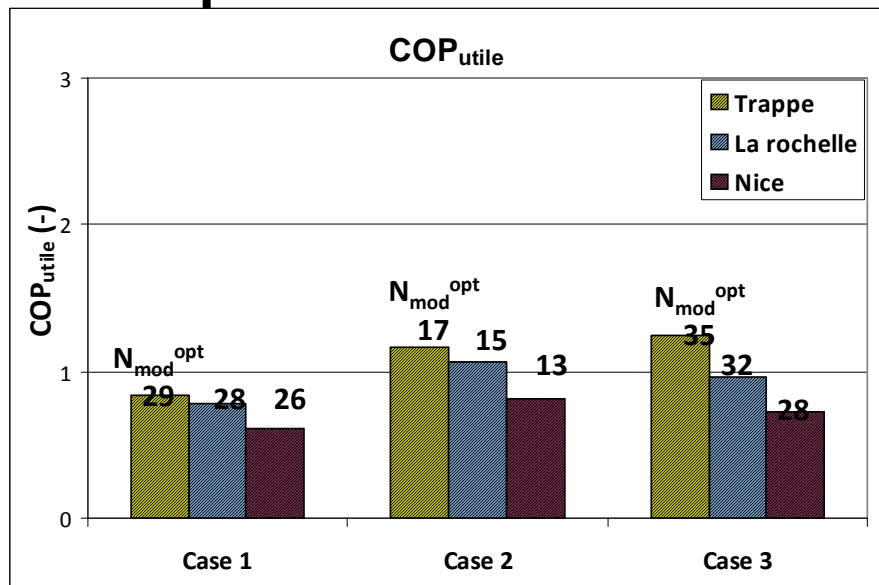


Figure 15 : Evolution du  $COP_{\text{utile}}$  en fonction du climat, pour les différents couplages

Trappes						
Couplage	$\Sigma P_{\text{utile}}$ (MWh)	$\Sigma Q_c$ (MWh)	$\Sigma P_{\text{elec}}$ (MWh)	$\Sigma P_{\text{vent}}$ (MWh)	$COP_{\text{utile}}$	COPPAC
Case1		4.61	1.82		0.86	1.9
Case2	2.1	2.85	1.16	0.61	1.18	1.61
Case3		3.65	1.01		1.25	2.24
La Rochelle						
Couplage	$\Sigma P_{\text{utile}}$ (MWh)	$\Sigma Q_c$ (MWh)	$\Sigma P_{\text{elec}}$ (MWh)	$\Sigma P_{\text{vent}}$ (MWh)	$COP_{\text{utile}}$	COPPAC
Case1		2.33	0.81		0.78	1.94
Case2	0.93	1.35	0.49	0.39	1.06	1.54
Case3		1.91	0.49		0.96	2.11
Nice						
Couplage	$\Sigma P_{\text{utile}}$ (MWh)	$\Sigma Q_c$ (MWh)	$\Sigma P_{\text{elec}}$ (MWh)	$\Sigma P_{\text{vent}}$ (MWh)	$COP_{\text{utile}}$	COPPAC
Case1		1.07	3.12		0.61	1.94
Case2	0.34	0.56	0.17	0.24	0.82	1.36
Case3		0.92	0.22		0.73	2.01

Figure 15: Bilan des énergies mises en jeu pour les différents couplage et climat

- La valeur  $COP_{\text{PAC}}$  est plus intéressant que la valeur  $COP_{\text{utile}}$
- $COP_{\text{utile}}$ :
  - ✓ Case3 > Case2 > Case1
  - ✓ Trappe > La rochelle > Nice
- L'association de la PACTE à d'autres systèmes peut aider à amélioration du  $COP_{\text{utile}}$  (un système avec un échangeur statique amont ou avec capteur géothermique)

# Conclusions & Perspectives

## ○ Modélisation

- Réalisation d'un modèle simplifié
- Etude du couplage PACTE / Bâtiment  
→ Détermination de performances instantanées & saisonnières

## ○ Optimisation pour les conditions instantanées

- Détermination de  $N_{\text{mod}}^{\text{opt}}$   
Scénario 1 : Couplage à  $T_{\text{ext}}$  :  $N_{\text{mod}}^{\text{opt}}$  existe : 40 modules  
Scénario 2 : Couplage à  $T_{\text{ext}}$  :  $N_{\text{mod}}^{\text{opt}}$  existe : 25 modules  
Scénario 3 : Couplage à  $T_{\text{geo}}$  :  $N_{\text{mod}}^{\text{opt}}$  existe : 35-40 modules
- $N_{\text{mod}}^{\text{opt}}$  dépend de l'écart de températures ( $\Delta T$ ) entre les deux face du module

## ○ Optimisation pour les conditions saisonnières.

- $\text{COP}_{\text{utile}}$  est toujours peu performant (ne dépasse pas 1.25 : Trappes avec cas 3) par rapport au  $\text{COP}_{\text{PAC}}$  (maximum 2.11: La Rochelle avec cas 3)
- L'association de la PACTE à d'autres systèmes peut aider à amélioration du  $\text{COP}_{\text{utile}}$

## ○ Perspectives

- Réduire le débit pour les températures chaudes pour réduire la part de la  $P_{\text{vent}}$  dans l'expression du  $\text{COP}_{\text{utile}}/\text{COP}_{\text{PAC}}$  pour améliorer la performance.
- Etude avec appoint pour favoriser le fonctionnement de la PACTE.



**MERCI  
POUR  
VOTRE ATTENTION**